第 38 卷第 3 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.3
2018 年 2 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201611062250
尤誉杰,王懿祥,张华锋,邱烷婷,吴敏娟.不同人为干扰措施对天然次生灌丛土壤肥力及蓄水能力的影响.生态学报,2018,38(3):1097-1105.
You Y J,Wang Y X,Zhang H F,Qiu W T,Wu M J.Effects of different human disturbances on soil water conversation and fertility of natural secondary shrub. Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):1097-1105.

不同人为干扰措施对天然次生灌丛土壤肥力及蓄水能力的影响

尤誉杰[1],王懿祥[1,*],张华锋[2],邱烷婷[1],吴敏娟[1]

1 浙江农林大学环境与资源学院,省部共建亚热带森林培育国家重点实验室,浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,临安　311300
2 临安林业局,临安　311300

摘要:亚热带常绿阔叶林遭反复干扰后退化形成的天然次生灌丛在未管护模式下难以恢复为乔木林。在浙江省临安市选择典型天然次生灌丛,以强度人为干扰为对照、分别进行保护性干扰和适度人为干扰,探讨灌丛土壤蓄水能力和肥力质量的响应。4 年试验结果表明:与强度人为干扰相比,保护性干扰和适度人为干扰后的土壤总贮水量、吸持贮水量和滞留贮水量分别提高了 12.41%、5.33%、17.37%和 29.13%、33.23%和 26.24%;最大持水量、毛管持水量和最小持水量分别提高了 23.35%、9.51%、17.55%和 48.63%、56.08 和 71.05%;与强度人为干扰相比,保护性干扰和适度人为干扰的综合肥力分别提高了 1.9%和 38.5%,其中保护性干扰的水解氮、有机碳和有机质含量提高了 12.11%、38.91%和 38.94%,适度人为干扰的水解氮、有效磷、有机碳和有机质含量提高了 61.97%、90.57%、130% 和 130.04%,保护性干扰和适度人为干扰的土壤综合评价指数分别提高了 15.43%和 58.94%。研究表明,与保护性干扰相比,适度人为干扰在土壤的蓄水保水、肥力和固碳增汇等方面更能达到预期的目标。在有条件经营的情况下,可以选择适度人为干扰措施对天然次生灌丛进行管理从而达到加快土壤恢复的目的。

关键词:天然次生灌丛;人为干扰;土壤蓄水;土壤肥力;土壤有机碳;封禁

Effects of different human disturbances on soil water conversation and fertility of natural secondary shrub

YOU Yujie[1],WANG Yixiang[1,*],ZHANG Huafeng[2],QIU Wanting[1],WU Minjuan[1]

1 *State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, School of Environment and resource,Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an* 311300, *China*
2 *Lin'an Forestry Bureau., Lin'an* 311300, *China*

Abstract: It is difficult for the natural secondary shrub originated from subtropical evergreen broad-leaved forest by repetitive disturbance to recover to the arbor forest without protective measures. To explore the response of soil water storage capacity and fertility quality of shrub to different disturbance, moderate human disturbance and protective human disturbance(PHD) were taken in typical natural secondary shrub with high human disturbance as control during the period 2012—2015 in Lin'an, Zhejiang Province, China. No protective measures were taken in high human disturbance stands, but artificial interference activities such as wood chopping and herb gathering occurred occasionally. As for the protective interference, no one was permitted entry. Target trees in the natural secondary thickets were selected and tended in moderate human disturbance stands. The integrated soil fertility was determined by Nemero index, and correlation methods were used to estimate the comprehensive evaluation index of soil. Compared with the control, the soil total storage, retention storage

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD22B0503)
收稿日期:2016-11-06;　　**网络出版日期**:2017-10-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: w_yixiang@126.com

and short term storage in protective disturbance and moderate disturbance plots increased by 12.41%, 5.33%, 17.37% and by 29.13%, 33.23%, 26.24%, respectively. Compared with control, soil maximum water-holding capacity, capillary water holding capacity, and minimum water-holding capacity in protective disturbance and moderate disturbance plots increased by 23.35%, 9.51%, and 17.55% by 48.63%, 56.08%, 71.05%, respectively. Comprehensive soil fertility of protective disturbance and moderate disturbance plots increased by 15.43% and 58.94% respectively when compared with control. Available nitrogen, organic carbon and soil organic matter of protective disturbance plots increased by 12.11%, 38.91% and 38.94%. Moreover, available nitrogen, available phosphorus, organic carbon and soil organic matter of moderate disturbance plots increased by 61.97%, 90.57%, 130% and 130.04%. The integrated soil quality index of protective disturbance and moderate disturbance plots increased by 15.43% and 58.94%, respectively. Bivariate correlation analysis indicated that there were strong positively correlation between the comprehensive soil fertility, soil water storage and soil organic carbon. The results showed that protective disturbance treatment decreased soil density, increased the total soil porosity, total water storage, available nitrogen and organic matter, which could be attributed to the faster growth rate of the trees and increasing amount of litterfall owing to the prohibiti on of firewood chopping and collection. Moderate disturbance not only banned firewood chopping and collection, but also selected and tended the target trees, releasing their competition. It accelerated the closure and biomass of the secondary shrub and enhanced the capability of vegetation interception on precipitation, thus, lessening precipitation on soil erosion. Tending biomass was kept inside leading an increase amount of litter. Compared to the high disturbance and protective disturbance, moderate disturbance decreased soil density, increased soil capillary, noncapillary, total porosity, total water storage, available nitrogen and organic matter. Protective disturbance and moderate disturbance reversed the retrogressive succession of the secondary shrub, accelerated the trees growth and improved the stand structure, resulting in improved soil nutrient cycling, increased soil organic matter and integrated fertility, forming a better status of tree growth and soil recovery, which promoted each other. In conclusion, MDH is better than PDH in leading the secondary shrub community to achieve the desired goal of soil water storage and water conservation, fertility and carbon sequestration. Thus, in the presence of favorable operating conditions, moderate human disturbance could be selected to accelerate the soil restoration of shrub.

Key Words: natural secondary shrub; human disturbance; soil water storage; soil fertility; soil organic carbon; closed forest management

常绿阔叶林是分布在我国亚热带地区的地带性植被类型,是亚热带陆地生态系统的重要组成部分[1-2]。由于人类的强度干扰,取而代之的是大面积处于不同退化程度的次生林、次生灌丛和灌草丛等[3],其中次生灌丛面积约占我国亚热带地区总面积的三分之一,是我国东部较为常见的植被类型[1,4]。表现出群落结构趋于简单、抗外界干扰能力差、涵养水源和土壤肥力质量减弱及土壤退化等的一系列退化特征。采取适合的人为干扰措施扭转这部分退化生态系统的逆行演替,恢复转变为正向演替对该区域的生态平衡和森林可持续发展具有重要的实践意义。植被演替与土壤性质演变的关系不仅是生态学研究的重要内容之一,也是森林经营管理者在森林地力普遍衰退现状下不得不思考的问题[5]。但目前对次生灌丛恢复演替的人为干扰方式及其土壤理化性质演变的相关研究较少。

对退化生态系统开展以植被恢复为目的的适度的人为经营干扰,可以在一定程度上改善群落结构,提高生物多样性和生产力,促进群落演替,同时也可以影响到土壤生态系统[6-7],最终影响到退化生态系统生态功能的全面恢复。植物和土壤二者互为环境因子,植物群落的演替过程也是植物、气候和土壤相互影响和作用的过程[8]。在长时间的恢复演替过程中,土壤是生态系统中水分平衡、凋落物分解和营养物质循环等生态过程的载体,土壤的恢复是退化森林生态系统恢复中不可忽视的重要组成部分[9]。对次生灌丛开展植被恢复意味着一种植被类型向另一种植被类型演替。为此,人为的干扰方式和频度必须有所改变,植物组成和覆盖

以及凋落物的性质和量也会随之发生变化,诸多生态过程的变化都将影响到土壤生态系统。

封禁和近自然经营是改善脆弱和退化森林生态系统的有效恢复模式[10-14]。由于封禁管理成本较低,技术要求不高,因而常作为次生灌丛群落恢复的保护性干扰措施;而近自然经营充分运用自然生产力和森林的自我恢复能力,尽量减少非自然因素和人为对森林生长的干扰,是一种适度性干扰方式[15-17]。为促使亚热带次生灌丛尽快恢复为森林植被,本文利用近自然经营中的林木分类方法对天然次生灌丛选择目标树进行抚育改造,进行适度的人为干扰,以促进目标树长高形成乔木层,观测在此过程中的土壤变化。在次生灌丛群落恢复演替进程中,土壤蓄水能力和肥力是土壤的基本属性和本质特征的反映,是衡量次生灌丛恢复程度的重要指标。浙江省灌丛地面积约为 153400 hm^2[18],基于此,本文以浙江省临安市典型次生灌丛为研究对象,以土壤蓄水能力和肥力质量对不同人为干扰措施的响应为内容,探讨浙江恢复次生灌丛的途径,以期为区域次生灌丛的恢复演替以及土壤恢复提供一定的科学参考。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究地点位于浙北山区临安市(29°56′—30°23′N,118°51′—119°52′E),该区域属中亚热带季风气候,年平均气温 15.9℃,年降水量 1614 mm,年均日照时数 1774 h,无霜期 237 d。地形地貌为低山丘陵,土壤以微酸性红壤土类为主。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,优势种主要有木荷(*Schima superba*)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)等。由于人为的干扰和破坏,常绿阔叶林常退化为次生灌丛植被。特别是还存在大量地段遭受人为干扰(如割灌草、火烧等),土壤严重退化,群落长时间停留在次生灌丛阶段,地带性常绿阔叶林的恢复十分缓慢,有些甚至根本没有恢复,灌丛群落成了相对稳定的人为偏途顶极,影响了森林生态系统的可持续发展[19]。

1.2　样地设置

2012 年 1 月,选择自然环境条件基本一致的典型天然次生灌丛作为试验林,由次生常绿阔叶林遭反复砍伐的情况下退化形成,平均高约为 1.6 m。经调查该林分的优势种为短柄枹(*Quercus glandulifera*)、檵木(*Loropetalum chinensis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、白栎(*Quercus fabri*)、乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)、冬青(*Ilex chinensis*)等。将其划分为两块界限明显的区域,一块作为强度人为干扰,不采取任何保护措施,樵采和采药等人为干扰活动时有发生;一块进行封禁管理,通过村干部和山下入口处的告示牌告知村民实行严格保护,严禁村民上山活动。将封禁区域的一半只进行单纯封禁管理,将其作为保护性干扰;另一半进行近自然经营的目标树抚育,作为适度人为干扰,即:在次生灌丛内踏查筛选出适应能力强的乔木树种作为重点培育的目的树种,确定灌丛内的苦槠、青冈、枫香(*Liquidambar formosana*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、麻栎、木荷、黄檀(*Dalbergia hupeana*)、冬青、野柿(*Diospyros kaki*)等树种作为优先目的树种,白栎、短柄枹作为备选目的树种。每隔 2—3 m 选择一株生长良好、干形通直、无病虫害、无损伤,竞争优势明显的林木作为目标树,对目标树进行除萌和割灌草,将割掉的灌草培于目标树附近;2012 年和 2013 年各抚育 2 次,其余同封禁处理。将上述的强度人为干扰(对照)、保护性干扰和适度人为干扰 3 种处理林分每种各设立 9 个 400 m^2(20 m ×20 m)的固定试验样地,各样地间距离 20 m 以上。2015 年 11 月复测时样地基本特征如表 1 所示。

表 1　不同人为干扰措施的样地基本特征表

Table 1　Basic plots properties of different human disturbances

干扰措施 Disturbance measures	2015 年平均胸径 Average DBH in 2015/m	2015 年平均树高 Average height in 2015/m	枯落物干重 Litter weight/(g/m^2)
强度人为干扰 High human disturbance	1.32±0.41a	2.08±0.56a	130.01±13.33c
保护性干扰 Protective human disturbance	2.71±0.95b	2.9±0.89b	178.89±13.47b
适度人为干扰 Moderate human disturbance	4.17±1.74c	4.19±1.63c	230.44±26.72a

同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

1.3 土壤样品采集与测定

2016 年 2 月,在每个样地内选择中心及 3 个距离中心 5 m 左右的地方作为采样点,取土深度为 20 cm。除去土壤表层凋落物在中心采样点用 100 mL 的环刀取样,用以测定土壤密度与田间最大持水量。用四分法分别在 3 个采样点采取 300 g 土壤样品,然后混合成一个土壤样品,带回实验室风干、研磨、去除直径大于 2 mm 石粒、植被根系和其他有机残体。土壤孔隙度采用威尔科克斯法测定[20],土壤的最大持水量、毛管持水量和最小持水量的测量方法采用《土壤农化分析手册》[21]。土壤化学性质的测定采用常规性方法进行测定[22],土壤有机碳采用重铬酸钾氧化法测定,土壤水解性氮采用碱解扩散法,土壤速效钾采用火焰光度法,土壤有效磷采用 Brayetal 1945 测定,土壤 pH 值使用 pH 3C 型精密酸度计测定。

1.4 土壤层贮水量计算

土壤孔隙度是体现土壤持水能力与贮水能力的重要指标,土壤孔隙度越高,土壤保水能力越强。非毛管孔隙度体现了土壤对降水的短期停滞量,毛管孔隙度体现了土壤的长期贮水量与入渗能力[23-24]。土壤层饱和贮水量是指土壤层的最大持水量,土壤层非毛管贮水量是指降雨后土壤短期储存的贮水量,二者都是计算土壤保水能力的重要指标,计算公式如下[25]:

$$W_t = P_t \times h \times s \tag{1}$$

$$W_{nc} = P_{nc} \times h \times s \tag{2}$$

$$W_c = P_c \times h \times s \tag{3}$$

式中, W_t 、W_{nc} 、W_c 为土壤层总贮水量、滞留贮水量、吸持贮水量; P_t 、P_{nc} 、P_c 为土壤总毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度;h 为样地平均土层厚度,本实验中计算的土层平均深度为 20 cm;s 为植被覆盖的面积。

1.5 土壤有机碳贮量

每个样地的单位面积土壤有机碳贮量采用以下公式计算:

$$C_{\text{soc}} = \text{SOC} \times h \times SD \tag{4}$$

式中,C_{soc} 为单位面积土壤有机碳贮量(g/m^2);SOC 为土壤有机碳含率; h 为土层深度(20 cm); SD 为土壤质量(g/cm^3)。

1.6 土壤综合评价指数的计算

采用内梅罗指数法对土壤综合肥力进行评价,然后采用相关系数法,从土壤肥力、土壤贮水量和土壤碳贮量三个方面对经营后的土壤进行综合评价。

1.6.1 内梅罗指数

内梅罗指数最早是依据单因子评价法,对水体进行水质的综合评价[26]。包耀贤等[27]发现内梅罗指数法用于长期施肥的土壤肥力的综合评价可以获得相较于传统方法更精确的结果。计算方法是先计算分肥力系数 IFI_i:

$$\text{IFI}_i = \begin{cases} \dfrac{x}{x_a} & x \leqslant x_a \\ 1 + \dfrac{(x - x_a)}{(x_b - x_a)} & x_a \leqslant x \leqslant x_b \\ 1 + \dfrac{(x - x_b)}{(x_c - x_b)} & x_b \leqslant x \leqslant x_c \\ 3 & x > x_c \end{cases} \tag{5}$$

式中,IFI_i为分肥力系数,x 为待测定值,x_a、x_b和 x_c分别为第二次全国土壤普查标准设置的各个分级标准的上下限(表 2)。

然后将各个分肥力系数代入修正的内梅罗公式计算土壤综合肥力[28]:

$$IFI = \sqrt{\frac{(IFI_{iave})^2 + (IFI_{imin})^2}{2}} \times \left(\frac{n-1}{n}\right) \quad (6)$$

式中,IFI 为土壤综合肥力,IFI_{iave} 为土壤肥力各指标的分肥力系数均值,IFI_{imin} 为土壤肥力各指标的分肥力系数最小值,n 为评价指标个数。

表 2　土壤肥力各个指标的分级标准值

Table 2　Grading values of soil fertility indexes

分级 Grades	有效氮 AN/(mg/kg)	有效磷 AP/(mg/kg)	速效钾 AK/(mg/kg)	有机质 OM/(g/kg)
x_a	60	3	40	10
x_b	120	10	100	20
x_c	180	20	150	30

1.6.2　相关系数法

相关系数法是模糊综合评判法的一种,是使用相关性分析得到某个评价指标与其他指标的相关系数的均值,该值与所有评价指标的相关系数均值之和的比值就是该项指标的权重,常用于对土壤综合肥力的评价[29]。基于模糊数学加乘法原则,综合土壤评价指数(Integrated soil quality index, ISQI)计算公式如下:

$$ISQI = \sum_{i=1}^{n} W_i P_i \quad (7)$$

式中,ISQI 为土壤综合评价指数(0≤ISQI≤1),其值越高代表综合质量越高,W_i 为第 i 项评价指标的权重,P_i 为第 i 项评价指标的隶属度,n 为评价指标个数。

1.7　数据分析

使用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析法(ANOVA)分析土壤各理化性质指标差异是否显著。采用双变量相关性分析法探求土壤肥力、土壤贮水能力和土壤有机碳贮量之间的相关性,最后通过 EXCEL 计算土壤综合评价指数,以此研究不同经营方式对 2012—2015 年土壤有机碳含量、土壤肥力和土壤贮水量的影响。

2　结果与分析

2.1　不同人为干扰措施对土壤贮水能力的影响

土壤容重和土壤孔隙度都是体现土壤的松紧度和贮水能力的重要指标。从表 3 可以得知,3 种经营处理在土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、总贮水量和滞留贮水量都存在显著差异,适度人为干扰在毛管孔隙度和吸持贮水量上与其他经营处理存在显著差异,保护性干扰与强度人为干扰在毛管孔隙度和吸持贮水量上差异不显著。与强度人为干扰相比,保护性干扰在总孔隙度、非毛管孔隙度、总贮水量和滞留贮水量显著提高,上升幅度分别为 12.39%、17.38%、12.41%和 17.37%;在毛管孔隙度与吸持贮水量上略微提高,升高 5.34%和 5.33%;土壤容重显著下降,下降了 12.21%。这说明,保护性干扰的土壤较强度人为干扰相比,土壤更为疏松,总贮水能力和短期滞留贮水能力优于强度人为干扰。适度人为干扰的土壤的总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总贮水量、吸持贮水量和滞留贮水量与强度人为干扰相比显著提高,上升幅度分别为 29.11%、33.24%、26.26%、29.13%、33.23%和 26.24%;与保护性干扰相比存在显著提高,分别提高了 14.87%、26.48%、7.56%、14.87%、26.48%和 7.56%。适度人为干扰的土壤的容重与强度人为干扰和保护性干扰相比都存在着显著下降,分别下降了 29.77%和 20%。这说明适度人为干扰的土壤最为疏松,贮水能力最强。

土壤水分是土壤肥力的重要促进因素,直接影响着地表植被的生长。根据图 1 得知,与强度人为干扰相比,保护性干扰的土壤的最大持水量、毛管持水量和最小持水量显著提高了 23.35%、9.51%和 17.55%,适度人为干扰则分别显著提高了 48.63%、56.08%和 71.05%。适度人为干扰的土壤的最大持水量、毛管持水量和最小持水量与保护性干扰相比显著提高了 20.49%、42.53%、45.51%。这说明适度人为干扰和保护性干扰处理

都可以提高土壤的持水能力,适度人为干扰效果好于保护性干扰。

表 3 不同人为干扰措施后的土壤贮水能力

Table 3 The soil water storage capacity after different human disturbances

干扰措施 Disturbance measures	土壤容重 Soil density/ (g/cm^3)	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary/%	非毛管孔隙度 Nocapillary/%	总贮水量 Total storage/ (t/hm^2)	吸持贮水量 Retention storage short term storage/ (t/hm^2)	滞留贮水量 Short term storage/ (t/hm^2)
强度人为干扰 High human disturbance	1.31±0.05c	50.43±2.05c	20.79±2.70b	29.63±2.61c	1008.5±41.02c	415.83±53.99b	592.67±52.19c
保护性干扰 Protective human disturbance	1.15±0.05b	56.68±2.00b	21.90±1.12b	34.78±2.35b	1133.63±39.9b	438±22.38b	695.63±46.96b
适度人为干扰 Moderate human disturbance	0.92±0.02a	65.11±0.93a	27.70±2.03a	37.41±2.68a	1302.23±18.53a	554±40.53a	748.20±53.61a

同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

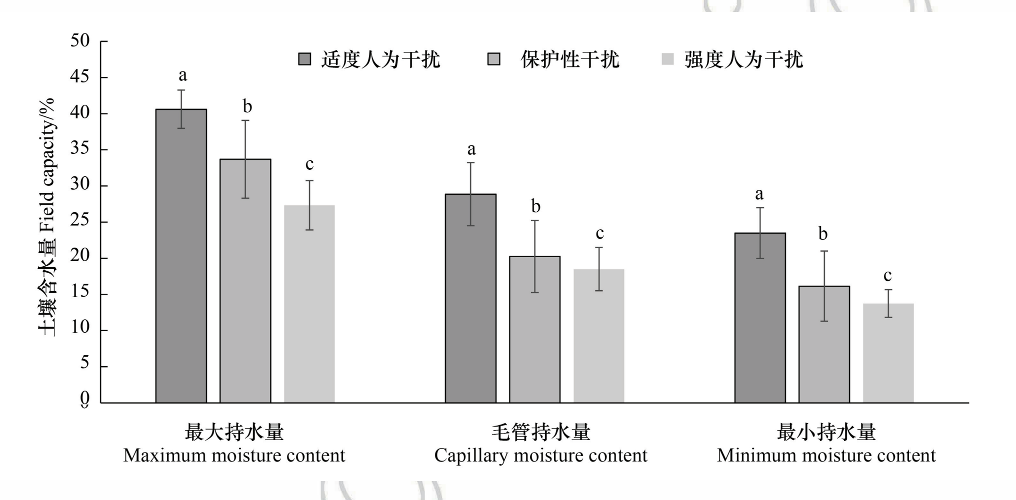


图 1 不同人为干扰处理的土壤持水能力

Fig.1 The soil water-holding capacity after different human disturbances

2.2 不同人为干扰对土壤肥力和土壤碳储量的影响

由表 4 可知,与强度人为干扰样地相比,保护性干扰样地的土壤水解氮、有机碳和有机质含量显著增加(P<0.05),增加幅度分别为 12.11%、38.91%和 38.94%;土壤的速效钾和有效磷含量则显著下降 12.06%和 20.08%。适度人为干扰样地的土壤水解氮、有效磷、有机碳和有机质含量与对照样地相比分别提高了 61.97%、90.57%、130% 和 130.04%。方差分析发现,二者在土壤水解氮、有效磷、有机碳和有机质上存在显著差异(P<0.05)。与强度人为干扰相比,适度人为干扰处理比保护性干扰处理对土壤的水解氮、有效磷、有机质、有机碳含量影响更大,尤其是有机质和有机碳,增加量是保护性干扰增加量的 3 倍。在 5 个指标中,有机碳和有机质变化更为明显,其次为水解氮,速效钾含量的变化则小。

2.3 土壤质量综合评价

从表 5 可以得知,土壤综合肥力、土壤贮水量和土壤有机碳贮量有着极强的正相关性(α=0.01)。土壤综合肥力平均相关性指数最高,为 0.724;土壤综合肥力与土壤有机碳含量的关系更为密切,其平均相关性指数为 0.776;土壤有机碳含量平均相关性指数大小介于二者之间,为 0.674;土壤层贮水量平均相关性指数最小,为 0.621,其与土壤综合肥力的相关性指数高于其与土壤层有机碳含量的相关性指数。在对土壤进行综合质量评价时,土壤综合肥力重要性高于土壤层有机碳,高于土壤层贮水量。通过公式(7)计算出,土壤综合肥力、土壤层保水能力,土壤固碳增汇能力占土壤综合质量评价指数的比例分别为 35.85%、30.77%和 33.38%。

表 4　不同人为干扰后的土壤肥力和有机碳

Table 4　The soil fertility and organic carbon after different human disturbances

干扰类型 Disturbance measures	水解氮 Available nitrogen/(mg/kg)	有效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	速效钾 Available potassium/(mg/kg)	有机碳 Organic carbon/(g/kg)	有机质 Soil organic matter/(g/kg)
强度人为干扰 High human disturbance	85.45±1.72b	4.88±0.37b	79.27±4.06a	10.1±0.55c	17.41±0.28c
保护性干扰 Protective human disturbance	95.8±2.36b	3.9±0.09b	69.71±0.67b	14.03±0.39b	24.19±0.67b
适度人为干扰 Moderate human disturbance	138.45±6.34a	9.3±1.16a	80.03±1.63a	24.8±2.45a	40.05±2.93a

同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

表 5　土壤肥力、贮水量和碳含量的相关性

Table 5　The correlation of soil fertility, water storage and carbon content

指标 Index	土壤综合肥力 Integrated fertility	土壤层贮水量 Soil layer water storage	土壤层有机碳含量 Soil organic carbon
土壤综合肥力 Integrated fertility	1		
土壤层贮水量 Soil layer water storage	0.671**	1	
土壤层有机碳含量 Soil organic carbon	0.776**	0.571*	1

**:在 0.01 水平上显著相关; *:在 0.05 水平上显著相关

通过表 6 可知,保护性干扰的土壤综合质量评价指数比强度人为干扰高 15.43%,适度人为干扰的土壤综合质量指数比强度人为干扰的高 58.94%,比保护性干扰高 37.69%。适度人为干扰的土壤的综合质量最高,保护性干扰次之。其中适度人为干扰在 3 种评价指标中均表现最好,适度人为干扰可以显著地增加样区的土壤肥力、增强水土保持能力和固碳能力。保护性干扰的土壤综合肥力指数只比强度人为干扰高出 2.13%,但是其土壤层贮水量和土壤层有机碳却比强度人为干扰高出 12.41%和 21.94%,致使其土壤综合质量评价指数高于强度人为干扰 15.43%。说明保护性干扰虽然不能显著的改善土壤肥力,但可以增加碳贮量,较好的增强土壤的贮水能力。

表 6　不同人为干扰措施的土壤综合质量评价指数

Table 6　The integrated soil quality index of different human disturbances

干扰类型 Disturbances measures	土壤综合肥力指数 Integrated fertility index	土壤层贮水量 Soil layer water storage/(t/hm^2)	土壤有机碳贮量 Soil organic carbon/(g/m^2)	土壤综合质量评价指数 Integrated soil quality index
强度人为干扰 High human disturbance	1.04±0.00b	1008.50±41.02c	3.97±0.06c	0.28±0.01c
保护性干扰 Protective human disturbance	1.06±0.00b	1133.63±39.9b	4.84±0.14b	0.31±0.01b
适度人为干扰 Moderate human disturbance	1.44±0.04a	1302.23±18.53a	6.84±0.50a	0.41±0.02a

3　讨论与结论

土壤的质量除了受自然因素影响,也受人为因素的影响[30]。人为干扰活动不仅会从森林带走大量的养分,显著减少土壤轻腐殖质量,直接导致土壤的肥力衰退,还通过人为踩踏和机械碾压等对土壤造成压实,直接或间接的导致土壤孔隙度、持水量、土壤入渗能力下降[31-32]。本研究的强度人为干扰区,樵采时有发生,不但将林木带出林分外,也使得灌丛平均高增加缓慢(表 1)。结果表明,与适度人为干扰与保护性干扰相比,强度干扰后土壤的孔隙度、贮水量和持水量增长缓慢,其中非毛管孔隙度和滞留持水量更易受影响;土壤的水解

性氮、有机质和有机碳下降明显。强度人为干扰活动导致了土壤蓄水保水能力、固碳能力和肥力的恢复速度明显小于适度人为干扰与保护性干扰区。如果要对次生灌丛的土壤进行恢复,必须要调整人为干扰方式。

本研究利用保护性干扰与适度人为干扰分别对该天然次生灌丛进行恢复,希望在改变林分结构和促成乔木林生长的同时,提高土壤质量。

研究结果表明,保护性干扰禁止了樵采等人为干扰活动,林木的恢复生长速度加快,导致平均胸径和平均高都显著增加,凋落物也随之增加(表 1);与强度人为干扰区相比,保护性干扰后的土壤容重明显减小,总孔隙度显著增加,贮水能力显著提高(表 4);土壤水解氮、有机碳和有机质含量显著增加,土壤肥力和土壤贮碳量显著提高。封禁可以显著增加林分内凋落物的贮存量[33]。凋落物增加可以起到减少地表径流流速和减少降水对地表的侵蚀的作用,使降水可以更充分的入渗到土壤,以此增加土壤的滞留水量,从而提升整体的土壤蓄水能力[5]。次生灌丛保护性干扰后,凋落物总量的增加和土壤滞留水量增加(表 1 和表 4),致使凋落物的沉降水解增加,导致土壤水解氮、有机碳和有机质含量显著增加(表 4)。马少杰等[34]研究也发现封山育林可以显著增加水解氮、有机碳和有机质含量[35]。适度人为干扰是在封禁的基础上对次生灌丛进行有目的的改造,在停止了樵采等人为破坏活动的同时通过筛选目标树种和目标树并进行抚育提高了目的树种的优势地位,减小了目标树的竞争压力,促进了目标树的生长,加快了灌丛到乔木林的演变(表 1)。一方面,林木高度和直径加快生长,植被盖度和生物量增加,提高了对降水的截留作用,降水对地表的侵蚀将进一步减弱,使得雨水将更为缓慢的入渗到土壤,加之植被根系的恢复生长,使得土壤孔隙度显著增加,土壤的蓄水保水能力提高(表 2)。土壤水分是促进土壤肥力的重要因素,土壤持水量的提高将加快凋落物的分解,进一步增加土壤肥力[5]。另一方面,与保护性干扰区缓慢增加凋落物不同,适度人为干扰区在初期通过围绕目标树进行的除萌、割灌草抚育和间伐竞争木,使得适度人为干扰区在初期枯落物数量显著高于其他干扰区,加之 4 年后其林木生长也好于保护性干扰区,致使其凋落物总量要高于其他干扰区。凋落物总量的增加,凋落物沉降分解速度的提高,增加了土壤的养分含量,导致了适度人为干扰区土壤综合肥力显著高于保护性干扰区(表 4)。本研究表明,通过适度人为干扰(目标树抚育)比保护性干扰(封禁)能更好的提高土壤的蓄水保水能力、土壤肥力和土壤固碳能力。

3 种人为干扰措施下土壤主要指标的相关性分析表明,土壤肥力与土壤贮水能力呈现强相关关系。土壤有机质可以促进土壤团聚体的形成,随着土壤团聚体增加,土壤总孔隙度也会增加[36-38]。土壤肥力和土壤有机碳含量呈现出强正相关性(表 5),这是因为土壤中氮元素增加会促进较轻的土壤碳分解,并使得较重的土壤碳化合物更为稳定[39]。土壤的综合肥力、有机质和有机碳三者之间存在着高相关性,是因为土壤肥力和有机碳主要是通过有机质分解而来,土壤有机质是生态系统生产力和更新中最重要的一部分,是植被与土壤恢复的关键因素[40]。保护性干扰和适度人为干扰将次生灌丛变为正向演替,加快了群落生长速度,改善林分结构,从而提高土壤有机质含量,改善土壤养分循环,增加土壤肥力,形成地上林木生长和土壤改善相互促进的状态。

综上所述,强度的人为干扰是次生灌丛土壤无法恢复的主要原因。对次生灌丛进行保护性干扰与适度人为干扰都可以增强土壤的水土保持能力、固碳增汇能力和肥力。与封禁保护相比,目标树抚育这种适度干扰更能有效的加快土壤理化性质的修复进程。

参考文献(References):

[1] 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980.
[2] 李昌华. 亚洲东部常绿阔叶林的分布. 自然资源, 1997, 19(2): 37-45.
[3] 王希华, 闫恩荣, 严晓, 王良衍. 中国东部常绿阔叶林退化群落分析及恢复重建研究的一些问题. 生态学报, 2005, 25(7): 1796-1803.
[4] 金小华, 宋永昌, 左文江. 皖南黟县次生灌草丛生物量的研究. 生态学报, 1990, 10(4): 328-332.
[5] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华, 何日明, 高妍夏, 迪玮峙. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2479-2486.

[6] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.

[7] 李静鹏, 徐明锋, 苏志尧, 孙余丹, 胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307.

[8] West D C, Shugart H H, Botkin D B. Forest Succession: Concepts And Application. New York: Springer, 1981: 185-211.

[9] Johnston J M, Crossley D A Jr. Forest ecosystem recovery in the Southeast US: Soil ecology as an essential component of ecosystem management. Forest Ecology and Management, 2002, 155(1/3): 187-203.

[10] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 侯喜禄, 周生路. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557.

[11] 戴全厚, 薛萐, 刘国彬, 勃海峰, 张健. 黄土丘陵区封禁对侵蚀土壤微生物生物量的影响. 土壤学报, 2008, 45(3): 518-525.

[12] 陆元昌. 近自然森林经营的理论与实践. 北京: 科学出版社. 2006.

[13] 吴建强, 王懿祥, 杨一, 朱婷婷, 朱旭丹. 干扰树间伐对杉木人工林林分生长和林分结构的影响. 应用生态学报, 2015, 26(2): 340-348.

[14] 王懿祥, 张守攻, 陆元昌, 孟京辉, 曾冀. 干扰树间伐对马尾松人工林目标树生长的初期效应. 林业科学, 2014, 50(10): 67-73.

[15] 田军, 张宝祥, 徐成立, 姚卫红, 王雄宾. 经营干扰对华北落叶松人工林群落演替趋势的影响. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16668-16670.

[16] 于立忠, 朱教君, 赵风军, 张艳红, 孙一荣. 干扰与森林经营管理//第十届中国科协年会论文集. 郑州: 中国科学技术协会, 2008.

[17] Fries C, Johansson O, Pettersson B, Simonsson P. Silvicultural models to maintain and restore natural stand structures in Swedish boreal forests. Forest Ecology and Management, 1997, 94(1/3): 89-103.

[18] 国家林业局. 全国森林经营规划(2016—2050 年). (2016-07-28)[2017-03-28]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-07/28/5095504/files/b9ac167edfd748dc8c1a256a784f40d5.pdf.

[19] 杨一, 王懿祥, 白尚斌, 刘蕾蕾, 朱婷婷, 朱旭丹, 尤誉杰. 临安次生灌丛植物多样性对林火烈度空间异质性的响应. 生态学报, 2016, 36(14): 4438-4446.

[20] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983.

[21] 劳家柽. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988.

[22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[23] 高茂盛, 廖允成, 李侠, 黄金辉. 不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2080-2087.

[24] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 赵世伟, 何方, 史福刚. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 70-75.

[25] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法. 北京: 中国科学技术出版杜, 1994.

[26] 谷朝君, 潘颖, 潘明杰. 内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题. 环境保护科学, 2002, 28(1): 45-47.

[27] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 黄庆海, 聂军, 张会民, 于寒青. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197-4204.

[28] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探. 土壤通报, 1994, 25(6): 245-247.

[29] 于寒青, 徐明岗, 吕家珑, 包耀贤, 孙楠, 高菊生. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1772-1778.

[30] Mou P, Mitchell R J, Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. Journal of Applied Ecology, 1997, 34(3): 645-656.

[31] Mo J M, Brown S, Peng S L, Kong G H, Fang Y T. Effects of human impacts on fine roots and soil organic matter of a pine forest in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 491-499.

[32] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695.

[33] 杨吉华, 张永涛, 高祥伟, 李增印, 王开增. 封山育林提高森林蓄水保土效益的研究. 水土保持研究, 2001, 8(3): 2-5.

[34] 马少杰, 李正才, 周本智, 格日乐图, 孔维健, 安艳飞. 北亚热带天然次生林封山育林对土壤肥力质量的影响. 江西农业大学学报, 2011, 33(2): 328-334.

[35] 欧阳学军, 黄忠良, 周国逸, 褚国伟, 李炯, 史军辉, 徐国良. 鼎湖山南亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究. 水土保持学报, 2003, 17(4): 51-54.

[36] Adams W A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. European Journal of Soil Science, 1973, 24(1): 10-17.

[37] Rawls W J, Nemes A, Pachepsky Y. Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. Developments in Soil Science, 2004, 30: 95-114.

[38] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.

[39] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman, W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. Nature, 2002, 419(6910): 915-917.

[40] Pei S F, Fu H, Wan C G. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 124(1/2): 33-39.